

Modelování mechanismů reprezentace těla u humanoidního robota iCub: od biologické inspirace k adaptivním a bezpečným strojům

Matěj Hoffmann

Istituto Italiano di Tecnologia

Via Morego 30

16163 Genoa, Italy

Email: matej.hoffmann@iit.it

Abstrakt

Lidé i zvířata bez problémů ovládají svá vysoce složitá těla a současně integrují multimodální sensorické informace. Zdá se, že nějaký model nebo reprezentace těla v mozku je v tomto případě nezbytný. Přestože bylo nashromážděno množství experimentálních pozorování a navrhnutá celá řada konceptů (jako např. schéma těla – body schema), mechanismy, které za fungováním zmíněných reprezentací stojí, jsou z velké části neznámé. Humanoidní roboti mají morfologii – fyzické proporce a sensorický a motorický aparát –, která je na určité úrovni abstrakce podobná primátům. Lze je tak použít jako nástroj k rozšíření výpočetních modelů a jejich ukotvení ve fyzickém světě a k realizování celých sensoricko-motorických smyček v interakci s prostředím. Představíme projekt, v němž tuto ideu realizujeme v humanoidním robotovi iCub, který vedle 53 stupňů volnosti, kamer s antropomorfickým uspořádáním, a úhlových enkodérů nově disponuje umělou kůží po celém povrchu těla. Právě taktilní modalita hraje při poznávání vlastního těla důležitou roli; robot proto aktivně provádí průzkum povrchu vlastního těla a sbírá taktilní, proprioceptivní a vizuální informace, ze kterých se pak snaží vytvořit první reprezentace. Zároveň předvedeme, jak lze tento postup aplikovat v robotice ke kinematické sebe-kalibraci a k vytvoření modelu "peripersonálního prostoru", který může robot využít k předvídání kontaktů s prostředím po celém povrchu těla.

1 Úvod

Lidé i mnohá zvířata přirozeně disponují 'povědomím' o celém svém těle a bez problémů integrují multimodální sensorické informace během interakce se svým nepřehledným a dynamicky se měnícím okolím. Tyto výjimečné schopnosti lze, alespoň částečně, připisat interním reprezentacím těla. I přes složitost muskuloskeletálního systému řídí svá těla bez nejmenších problémů, udržujíce a aktualizujíce informaci o okamžité tělesné konfiguraci v reálném čase. Tradiční robotické systémy dneška naproti tomu většinou spoléhají na předprogramované reprezentace a 'slepe' vykonávané trajektorie koncového článku. Schopnost adaptace na neočekávanou změnu prostředí, popř. samotného 'těla' robota, většinou

zcela chybí. Modelování vývoje a fungování reprezentací těla pomocí robotů tak může na jedné straně pomoci osvětlit mechanismy, které jsou zodpovědné za chování, které pozorujeme v přírodě, a na druhé straně otvírá cestu robotům, které se schopností adaptace alespoň částečně přiblíží lidem.

1.1 Reprezentace těla v biologii

Reprezentace těla byly po mnoho desetiletí předmětem výzkumu ve filosofii, psychologii, i neurovědách. Výzkumníci přišli s celou řadou konceptů jako schéma těla (body schema), 'obraz těla' (body image), strukturální popis těla (body structural description), reprezentace peripersonálního prostoru a mnoha dalšími. Nicméně, přestože existuje celá řada experimentálních pozorování, konvergence jejich interpretací je omezená a mechanismy, které jsou za pozorované jevy zodpovědné, zůstávají převážně neznámé (pro přehled viz např. (Graziano a Botvinick, 2002; Holmes a Spence, 2004; de Vignemont, 2010)).

Reprezentace těla úzce souvisí s reprezentací takzvaného peripersonálního prostoru (peripersonal space). Předměty, které se v tomto prostoru nachází, jsou v našem dosahu; zároveň ale mohou představovat hrozby a vyžadovat odpovídající úhybné reakce. Tento prostor proto zasluhuje speciální neuronální obvody, které se věnují jeho reprezentaci a zpracování (parietálně-frontální síť v mozku primátů) (Graziano a Cooke, 2006; Holmes a Spence, 2004).

1.2 Reprezentace 'těla' v robotice

Téměř všechny roboty, které provádějí úlohy související s manipulací, jsou závislé na modelech své kinematiky a dynamiky. Jejich úspěch je pak do značné míry určen přesností takových modelů. Tyto modely jsou většinou založeny na specifikacích strojního návrhu (např. CAD výkresy) robota. Nepřesnosti se ale nevyhnutelně objeví při montáži, díky mechanické pružnosti, nebo prostě z důvodu použití levných součástek. Proto je nutné přesné parametry modelu získat pro každý exemplář robota pomocí kalibrace. Jedná se však často o především časově náročné procedury. Vzhledem k tomu, že se podmínky

(stav součástí robotu) mění v čase, je potřeba takové postupy pravidelně opakovat. Proto se důležitým tématem stala sebe-kalibrace (viz přehledové články (Hoffmann a spol., 2010; Sigaud a spol., 2011)).

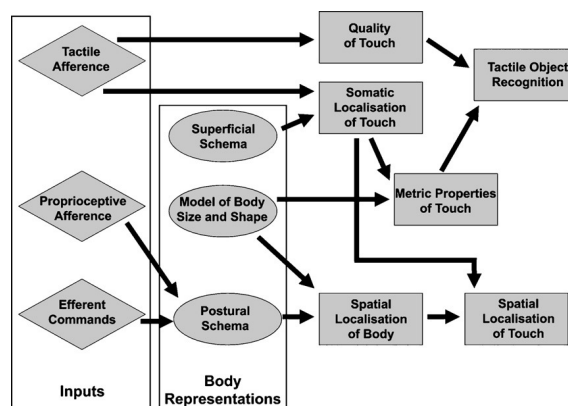
2 Tvorba reprezentace vlastního těla z vizuálně-proprioceptivně-taktilních korelací

Reprezentace těla jsou adaptivní (či plastické) v delších i kratších časových měřítkách. Delší měřítko je ontogenetické: neuronální struktury, které kódují vlastnosti (např. rozměry) těla, se musí aktualizovat s tím, jak se tělo během vývoje mění. Nejde ale jen o to, že tělo fyzicky roste, ale vyvíjí se celý sensoricko-motorický aparát, zlepšuje se např. rozlišení vizuální informace apod. Jádrem tohoto procesu se pravděpodobně nachází v raném dětství. Podle Rochat (1998) dochází zhruba ve věku 2-3 měsíců ke kalibraci těla – děti zkoumají vlastní tělo, jak se pohybuje a jedná v interakci s prostředím. Zdá se, že děti jsou přitahovány a aktivně účastny v prozkoumávání bohatých intermodálních redundancí, časových kontingencí, a prostorových kongruencí sebe-percepce. Jednou z možných kalibračních metod může být sebe-stimulace: dvojitý dotyk (tedy na 'dotýkané' a 'dotýkající se' části těla) lze odlišit od jednoduchého dotyku (kontakt s okolím) a použít jako identifikaci vlastního těla a zároveň využít korelace s dalšími modalitami – tedy kromě taktilní: motorické, proprioceptivní a vizuální.

Reprezentace těla v mozku není s největší pravděpodobností centralizovaná a holistická, nýbrž spíše vyvstává z interakce mnoha částečných, uni- či bimodálních reprezentací, které je do určité míry možno chápat jako hierarchii – viz např. Medina a Coslett (2010), kteří na nejnižší úrovni hovoří o primárních somatosensorických reprezentacích – somatotopicky utvořených mapách povrchu kůže. Na druhou úroveň situují takzvané reprezentace formy těla (body form representations), kde se zkrácené primární reprezentace 'překalibrují' na skutečnou velikost a tvar těla. Na poslední úrovni postulují posturalní reprezentace (týkající se pozice / polohy / konfigurace těla), které kódují pozici končetin v externích referenčních rámcích. Je potřeba však mít stále na paměti, že takřka všechna propojení jsou obousměrná, rekurentní, a tudíž chápání mechanismů reprezentace těla jako postupnou integraci informací ve směru zdola nahoru má jen omezenou platnost.

Jednotlivé 'částečné reprezentace' také různým způsobem čerpají z různých sensorických (a popř. i motorických) modalit. Vizuální informace hrají bezesporu důležitou – pro reprezentaci těla v prostoru u dospělých jedinců pravděpodobně dominantní – roli, nicméně proprioceptivní a taktilní vstupy a s nimi spojené reprezentace jsou bezesporu významné. Schutz-Bosbach a spol. (2009) např. zkoumali vliv nevizuální sensoricko-motorické zkušenosti na "strukturální reprezentaci těla". Longo a spol.

(2010) předložili schematickou reprezentaci (viz Obr. 1), jak by možná kombinace taktilních, proprioceptivních a motorických vstupů se somatosensorickými reprezentacemi mohla vypadat a jaké funkce mohou jednotlivé podmnožiny plnit. Např. pro lokalizaci taktilního stimulu na těle (somatic localisation of touch) je zapotřebí kromě vlastního taktilního stimulu (tactile afference) ještě reprezentaci, která se nazývá povrchové schéma (superficial schema) – v podobném významu jako v klasickém článku Head a Holmes (1911). Pro lokalizaci stejného stimulu v prostoru (spatial localisation of touch) již ale navíc potřebujeme proprioceptivní a popř. i motorické vstupy (proprioceptive afference, efferent commands), jejich kombinaci s posturálním schématem a dále pak v kombinaci s modelem velikosti a tvaru těla prostorovou lokalizaci těla.



Obr. 1: Model somatoperceptuálního zpracování informace zdůrazňující roli reprezentací těla. Vstupy jsou označeny kosočtverci, reprezentace těla ovály a perceptuální procesy obdélníky. Obrázek i text dle (Longo a spol., 2010).

3 Modelování pomocí robota iCub

Z předchozích oddílů vyplývá, že jak kognitivní psychologie tak neurovědy přišly s celou řadou pozorování a také s návrhy celé řady konceptů (jen výše jsme zmínili schéma těla, obraz těla, primární somatosensorické reprezentace, reprezentace formy těla, strukturální popis těla, povrchové schéma, posturální schéma, model velikosti a tvaru těla). Jejich podstata – mechanismy, které za nimi stojí – a jejich propojení však zůstává nejasné. I velmi abstraktní schémata jako Obr. 1 jsou spíše světlou výjimkou.

Humanoidní roboti mají morfologii – fyzické proporce a sensorický a motorický aparát –, která je na určité úrovni abstrakce podobná primátům. Lze je tak použít jako nástroj k rozšíření výpočetních modelů a jejich ukotvení ve fyzickém světě a k realizování celých sensoricko-motorických smyček v interakci s prostředím. Takový postup je vlastní kognitivní vývojové robotice

(viz přehledový článek Asada a spol. (2009)); přehled o použití robotů konkrétně k modelování reprezentací těla lze získat z Hoffmann a spol. (2010)).

Humanoidní robot iCub (Obr. 2) je open-source platforma pro výzkum v kognitivní robotice (Metta a spol., 2010). Robot má 53 stupňů volnosti s úhlovými enkodéry, kamery s antropomorfním uspořádáním a nově disponuje umělou kůží po celém povrchu těla (Maiolino a spol., 2013).



Obr. 2: Robot iCub v konfiguraci sebe-doteku. Jeho kinematická struktura (délky jednotlivých segmentů a úhly mezi nimi) je zjednodušeně znázorněna modře. Červená ohniska odpovídají taktilním stimulacím na levé a pravé ruce.

V našem případě, kdy chceme modelovat ontogenezi reprezentací těla z korelací/kontingencí mezi různými senzorickými modalitami, jsme tedy implementovali automatickou verzi 'sebedotýkání' (technické detaily implementace lze nalézt v (Roncone a spol., 2014)). Robot tedy aktivně provádí průzkum povrchu vlastního těla a sbírá taktilní, proprioceptivní a vizuální informace (Obr. 2), ze kterých se pak snaží vytvořit první reprezentace. Takto nasbíraná data jsou posléze zpracovávána biologicky motivovanými učícími se algoritmy. V současnosti se soustředíme na somatosenzorické reprezentace a používáme samoorganizující se mapy nad taktilními a proprioceptivními vstupy, abychom získali reprezentace podobné primárním somatosenzorickým mapám v Brodmannových oblastech 3a a 3b – podobné známým homunkulům (Penfield a Boldrey, 1937). Návazně pak zkoumáme kontingence v taktilní a proprioceptivní modalitě dohromady během 'dvoj-dotykových' konfigurací a jak by z nich bylo

možno odvodit první modely těla s prostorovými prvky.

4 Využití v robotice

Tato oblast výzkumu má své uplatnění i v robotice. Jedním takovým směrem je oblast automatické kalibrace. Výkon např. průmyslových robotů závisí na přesných modelech 'těl' daných robotů a často i jejich prostředí. Přesné modely lze získat za pomoci speciálních zařízení (např. kalibračních komor); jak se ale podmínky mění v čase, např. kvůli opotřebení robotu, je potřeba postup opakovat. Metody automatické sebekalibrace, které nevyžadují žádné dodatečné vybavení, jsou tedy žádoucí. U robotů, které disponují nějakou formou 'kůže', neboli taktilních senzorů na povrchu těla (takových technologií přibývá, viz např. (Dahiya a Valle, 2013; Mastrogiovanni a spol., 2015)), lze právě 'sebedoteku' využít k uzavření kinematické smyčky a získat tak redundantní informaci o určitém bodě v prostoru, kterou lze využít ke kalibraci kinematické reprezentace – viz Roncone a spol. (2014).

Druhou významnou aplikační oblastí v robotice je implementace peripersonálního prostoru – viz oddíl 1.1. Roboti opouštějí omezená a dobře předvídatelná prostředí továren a vstupují do mnohem méně 'kontrolovatelných' prostředí a dokonce začínají sdílet prostor s lidmi. V důsledku toho se musí dynamicky přizpůsobovat nepředvídatelným interakcím a zaručit bezpečnost vlastní i ostatních. Robotické technologie ale často spoléhají na 'slepě' vykonávané trajektorie koncového članku, zatímco zbytek těla je reprezentován kinematickým řetězcem, přičemž objem a povrch celého těla často nejsou zohledněny. Robotická kůže nabízí jedinečnou příležitost, jak se naučit přirozeně reprezentovat prostor, který bezprostředně obklopuje tělo robota. Představíme náš algoritmus, který spočívá v distribuované reprezentaci, prostorových receptivních polích, které obklopují jednotlivé taktilní prvky na kůži (taxely) (Roncone a spol., 2015). Tato reprezentace se vytváří na základě zkušenosti robota s objekty, které 'nalétávají' na jeho tělo. Robot je sleduje zrakem; pokud nakonec dojde ke kontaktu s kůží, vzniklá vizuálně-taktilní kombinace je využita k adaptaci prostorové reprezentace okolí daného taxelu. Zároveň lze takto vzniklou reprezentaci využít k tomu, že se robot vyhýbá kolizím předmětů s povrchem svého těla a vzniká tak jakási 'ochranná bublina' (margin of safety), kterou disponují i lidé a zvířata (viz (Graziano a Cooke, 2006)).

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Marie Curie Intra-European Fellowship (iCub Body Schema 625727) v rámci 7. rámcového programu EU (FP7-PEOPLE-2013-IEF).

Literatura

- Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H., Inui, T., Yoshikawa, Y., Ogino, M. a Yoshida, C. (2009). Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 1(1):12–34.
- Dahiya, R. S. a Valle, M. (2013). *Robotic Tactile Sensing*. Springer.
- de Vignemont, F. (2010). Body schema and body image - pros and cons. *Neuropsychologia*, 48(3):669–680.
- Graziano, M. a Botvinick, M. (2002). *Common Mechanisms in Perception and Action: Attention and Performance*, vol. XIX, kap. How the brain represents the body: insights from neurophysiology and psychology, str. 136–157. Oxford Univ Press.
- Graziano, M. a Cooke, D. (2006). Parieto-frontal interactions, personal space and defensive behavior. *Neuropsychologia*, 44:845–859.
- Head, H. a Holmes, H. G. (1911). Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34:102–254.
- Hoffmann, M., Marques, H., Hernandez Arieta, A., Sumioka, H., Lungarella, M. a Pfeifer, R. (2010). Body schema in robotics: a review. *IEEE Trans. Auton. Mental Develop.*, 2 (4):304–324.
- Holmes, N. P. a Spence, C. (2004). The body schema and the multisensory representation(s) of peripersonal space. *Cogn Process*, 5(2):94–105.
- Longo, M., Azanon, E. a Haggard, P. (2010). More than skin deep: Body representation beyond primary somatosensory cortex. *Neuropsychologia*, 48:655–668.
- Maiolino, P., Maggiali, M., Cannata, G., Metta, G. a Natale, L. (2013). A flexible and robust large scale capacitive tactile system for robots. *Sensors Journal, IEEE*, 13(10):3910–3917.
- Mastrogiovanni, F., Natale, L., Cannata, G. a Metta, G. (2015). Special issue on advances in tactile sensing and tactile-based human–robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, 63:227–229.
- Medina, J. a Coslett, H. (2010). From maps to form to space: Touch and the body schema. *Neuropsychologia*, 48(3):645 – 654.
- Metta, G., Natale, L., Nori, F., Sandini, G., Vernon, D., Fadiga, L., von Hofsten, C., Rosander, K., Lopes, M., Santos-Victor, J., Bernardino, A. a Montesano, L. (2010). The icub humanoid robot: An open-systems platform for research in cognitive development. *Neural Networks*, 23(8-9):1125–1134.
- Penfield, W. a Boldrey, E. (1937). Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, 37:389–443.
- Rochat, P. (1998). Self-perception and action in infancy. *Exp Brain Res*, 123:102–109.
- Roncione, A., Hoffmann, M., Pattacini, U. a Metta, G. (2014). Automatic kinematic chain calibration using artificial skin: self-touch in the icub humanoid robot. V *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, str. 2305–2312.
- Roncione, A., Hoffmann, M., Pattacini, U. a Metta, G. (2015). Learning peripersonal space representation through artificial skin for avoidance and reaching with whole body surface. V *Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
- Schutz-Bosbach, S., Musil, J. a Haggard, P. (2009). Touchant-touche: The role of self-touch in the representation of body structure. *Consciousness and Cognition*, 18(1):2 – 11.
- Sigaud, O., Salaun, C. a Padois, V. (2011). On-line regression algorithms for learning mechanical models of robots: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(12):1115 – 1129.